



复杂油藏物理法、物理-化学复合法
强化开采理论与技术丛书

卷一

液-固体系微粒表面 沉积分散运移微观动力学

◎ 蒲春生 著

石油工业出版社

复杂油藏物理法、物理-化学复合法强化开采理论与技术丛书（卷一）

液-固体系微粒表面沉积分散运移 微观动力学

蒲春生 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为丛书的第一卷,系统地描述了液-固体系微粒在固体表面以及多孔介质孔隙表面沉积、分散与运移的微观动力学特征,是特种油藏物理法强化开采、物理-化学复合合法强化开采的重要理论基础之一。

本书可供从事油气田开发工程胶体界面化学、环境科学、土壤科学、水土资源保护、环境工程、岩土工程、给排水工程、地质灾害防治工程,以及医药、卫生、生物分离、造纸、印刷、涂料、高分子材料等方面的科研工作者和工程技术人员参考,也可以作为相关专业领域高年级大学生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

液-固体系微粒表面沉积分散运移微观动力学/蒲春生著.

北京:石油工业出版社,2008.2

(复杂油藏物理法、物理-化学复合合法强化开采理论与技术丛书.卷1)

ISBN 978-7-5021-6221-4

I. 液…

II. 薄…

III. 油气藏-微流体动力学

IV. TE31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 123173 号

液-固体系微粒表面沉积分散运移微观动力学

蒲春生 著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.25

字数:396 千字 印数:1—2000 册

定价:68.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

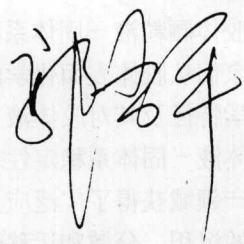
胶体颗粒液-固体系稳定性微观动力学和微粒在固体表面沉积、分散与运移微观动力学是制药、生物分离、造纸、印刷、涂料、水土保持、废水处理、水质净化、给水排水、油气田开发储集层保护与提高油气采收率等许多领域中重要的基本力学现象。在室内微观实验直接观察测试的基础上,建立不同流场条件下微观动力学理论与数学模型,定量预测评价流动场中液-固体体系的微观动力学特征及其主要控制因素与影响规律,为相关工程技术过程的材料优选与研制、工程参数优化决策、提高产品质量和工程效果提供理论基础,一直是国内外相关领域科学家和工程技术人员十分关注的科学问题。

胶体颗粒液-固体系稳定性微观动力学是典型的胶体表面现象,长期以来,国内外科学家们从胶体表面化学的基本原理出发,对液-固体体系中颗粒间的胶体表面作用微观动力学特征及其对胶体液-固体系稳定性的影响规律进行了大量实验和理论研究,形成了胶体液-固体系稳定性理论框架和胶体体系絮凝动力学基本理论体系,并在相关工农业生产领域获得了广泛应用。而胶体颗粒液-固体系在不同的流场条件下,微粒在固体表面的沉积、分散和运移微观动力学特征除了受胶体颗粒间、胶体颗粒与固体表面间的胶体表面作用势能的影响外,还要受到固体表面附近微观流场水动力学的影响与控制,是一个非常复杂的胶体界面化学与水动力学耦合过程,其定量动态预测与评价理论和数学模拟技术研究的难度很大。波兰、德国、前苏联、美国和加拿大的 Z. Adamczyk, J. C. Dabros, T. G. M. Ven de Ven, M. M. Sharma, Y. C. Yortsos, Chi. Tien, A. C. Payatakes 等科学家利用微观可视化模型系统,针对不同状态条件下的液-固体系颗粒在固体表面的沉积与分散微观动力学现象进行了大量的直接实验观察与统计研究,并在各自的简化条件下建立了相应的理论与数学模型,取得了一些重要的成果,国内在此领域的研究工作相对较少。

近 20 年来,在前人研究工作的基础上,蒲春生教授一直坚持在这一领域坚韧地跋涉,取得了一系列重要研究成果,初步形成了液-固体系微粒表面沉积、分散与运移微观动力学的基本理论体系。本专著首次从胶体液-固体系微粒与固体表面的微观电子特征与表面双电子层微观分布的定量描述出发,建立了液-固体系微粒与固体表面间的胶体力学场和固体表面附近的水动力学场耦合作用条件下微粒运动轨迹数学模型与运动微粒输送扩散方程及其相应的初边值条件;通过简化条件下的解析解和复杂条件下的数值解,动态预测与评价液-固体系微粒在固体表面的沉积、分散和运移规律。

系统研究了流场、颗粒与固相表面电性、颗粒尺寸、悬浮体的离子浓度以及固体表面粗糙度、电性分布非均匀性、沉积微粒的阻碍作用等因素对微粒沉积、分散、运移微观动力学特征的影响规律。在此基础上,将胶体微粒在表面沉积、分散和运移微观动力学模型与多孔介质渗流理论相结合,建立了胶体液-固体体系在多孔介质流动过程中微粒在空隙介质表面的沉积、分散、运移的微观动力学理论与数学模型,并给出了在相关工程领域中的应用示例。

本书是迄今为止第一部系统阐述胶体液-固体体系微粒表面沉积、分散与运移微观动力学基本理论与数学模拟技术的专著,是从事胶体界面化学、环境科学、土壤科学、水土资源保护、环境工程、岩土工程、给水排水工程、地质灾害防治工程、油气田开发工程,以及医药、卫生、生物分离、造纸、印刷、涂料、高分子材料等方面的科研工作者和工程技术人员很好的参考书。同时,本书的出版也必将对相关学科领域的基础研究起到重要的推动作用。



2006年8月5日

前 言

当前,我国石油工业逐步严峻的形势,石油天然气产量的增加与国民经济的快速发展形成了尖锐的矛盾,东部地区的大庆、胜利、辽河、大港等老油田基本上都已陆续进入注水开发的中、高含水期,并面临油田含水逐年升高、原油产量不断下降的难题。新发现并投入开发的油田绝大多数属于低渗透、特低渗透,稠油、超稠油等难动用油藏,而且这些新增原油储量大部分处于生态环境脆弱的中西部沙漠、戈壁、黄土高原地区,以及滩海和深海地区,储层类型多、埋藏深、地质条件复杂、地理条件恶劣,多数油藏整体采收率低,资源浪费严重,开发成本很高,技术难度极大。同时,由于这些地区的生态环境极为脆弱,给油田的开发带来了更为严重的困难。因此,如何在不断发展、完善油田现有开发及采油工艺技术的基础上,加快寻找、研究、发展一些效果好、成本低、不污染油层、对生态环境不造成破坏的原油增产与提高采收率的新技术和新方法,最大限度地提高难动用原油储量的产量和采收率,保护油层和生态环境,降低综合成本,提高整体经济效益与社会效益,正逐步成为我国石油科技工作者共同关注的问题。物理法强化采油技术和物理-化学复合法强化采油技术就属于这类新方法。研究开发适合我国难动用油藏实际情况的高效、低成本物理法强化开采和物理-化学复合法强化开采与提高采收率新技术具有十分重要的意义。

物理法强化开采技术利用大功率声波、超声波、电磁波、电液压脉冲波、爆燃气体高压冲击波等物理场来处理、激励油气储集层,实现注采井的增产增注和提高油藏整体采收率的目的,具有效果好、适应范围广、工艺简单、成本低廉、不污染油层与生态环境等特点,是近年来低渗透、特低渗透,稠油、超稠油等难动用油藏高效开发的一个十分重要的发展方向。物理-化学复合法强化采油技术就是将各种物理场对油藏的激励作用和化学处理剂对油藏的化学作用有机地结合起来而形成的高效复合采油增产措施与提高原油采收率的新技术。1987年以来,作者所带领的科研项目组针对我国低渗透、特低渗透和稠油、超稠油,以及中、高含水等难动用油藏实际,一直致力于储层液-固体系微观动力学、储层波动力学、储层伤害孔隙堵塞预测诊断与评价、波场强化采油、电磁波强化采油、燃爆压裂强化采油等领域的基本理论与工程应用方面的学习和研究工作,并逐步将低频水力脉冲波、声波、超声波、电磁波、电液压脉冲以及高能气体压力波与化学强化采油技术相结合,系统研究物理-化学复合强化采油理论与技术。特别是近10年来,项目组的研究工作被列入了国家西部开发科技行动计划重大科技攻关课题“陕甘宁盆地特低渗油田高效开发与水资源可持续发展关键技

术研究”(2005BA901A13)、国家 973 计划“中国高效气藏成藏理论与低效气藏高效开发基础研究”三级专题“气藏气/液/固体系微观动力学特征”(2001CB20910704)、国家自然科学基金“油井爆燃压裂中毒性气体生成与传播规律研究”(50774091)、教育部重点科技攻关项目“振动-化学复合增产技术研究”(205158)、中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目“低渗油田大功率弹性波层内叠合造缝与增渗关键技术研究”(05E7038)、中国石油天然气股份公司风险创新基金项目“电磁采油系列装置研究与现场试验”(2002FX-23)、陕西省重大科技攻关专项计划项目“陕北地区特低渗油田保水开采提高采收率关键技术研究”(2006KZ01-G2)和陕西省高等学校重大科技攻关项目“陕北地区低渗油田物理-化学复合增产与提高采收率技术研究”(2005JS04),以及大庆、胜利、辽河、大港、长庆、延长油矿、塔里木、吐哈、吉林、中原等石油企业的科技攻关项目和技术服务项目,使相关研究与现场试验工作取得了十分重要的进展,获得了良好的经济效益与社会效益。在作者及其合作者 20 年研究工作积累的基础上,结合前人有关的研究工作,形成了一套适合我国难动用油藏实际的高效低成本物理法和物理-化学复合法强化开采与提高采收率基本理论及配套技术的基本框架,总结撰写出了这套特种油藏物理法、物理-化学复合法强化开采理论与技术研究丛书。在作者 20 年的研究工作和本丛书的撰写过程中,自始至终得到了郭尚平院士、韩大匡院士、王德民院士、戴金星院士、罗平亚院士、袁士义院士、李佩成院士、张绍槐教授、葛家理教授、张琪教授、李仕伦教授、陈月明教授、赵福麟教授等前辈们的热心指导与无私帮助,郭尚平院士还特别为本书作序。在此,特向先生们致以崇高的敬意和由衷的感谢。

本书为丛书的第一卷,系统地描述了液-固体系微粒在固体表面以及在多孔介质孔隙表面沉积、分散与运移的微观动力学特征,是特种油藏物理法强化开采、物理-化学复合法强化开采的重要基础之一。

液-固体系中胶体颗粒在固体表面的沉积、分散与运移,是医药、喷涂、印刷、造纸、生物细胞分离、膜材料、催化、水土保持、水质净化、废水处理、给水排水、岩土工程、地质减灾、油气田开发中储集层保护与环境污染控制等学科领域和工程技术中十分重要的微观动力学过程。液-固体系微粒表面沉积、分散与运移的微观动力学特征除了受到重力、流体牵引力和流体黏性阻力等组成的水动力学体系影响外,还要受到布朗扩散力、表面间双层排斥力、表面间范德华引力、表面间波恩短程斥力等组成的胶体力学体系的影响,是一个非常复杂的物理化学与动力学过程。水动力学体系可以由黏性流体动力学和多孔介质渗流力学原理来进行描述,而其胶体力学体系则主要受到固相颗粒表面的电荷平衡状态和液-固体系间的电性特征和阳离子交换特征的影响,需要应用胶体微观动力学原理来予以描述。如何将体系中胶体颗粒尺度的微观性与固体表面尺度的宏观性、体系中流体流动的整体宏观性与固体表面附近流体流

动的微观性,以及体系中胶体力学体系与水动力学体系等复杂关系有机地结合起来,在实验研究与评价液-固体系微粒沉积、分散与运移的机理的基础上,建立动态描述这一复杂过程的微观动力学理论与数学模型,定量评价这一复杂过程的主要控制因素及其影响规律,并将理论研究结果用于相关学科与工程领域的优化决策实践,对于相关领域的安全生产与质量控制具有十分重要的意义。

全书共分10章,第1章阐述了液-固胶体体系的基本动力学特征及其基本分析方法;第2章阐述了液-固体系表面电荷平衡基本理论;第3章阐述了液-固体系表面阳离子交换基本理论;第4章阐述了液-固体系微粒在固体表面沉积与分散微观静力学模型;第5章阐述了固体颗粒表面粗糙程度对范德华引力势能的影响;第6章阐述了液-固体系微粒在表面的沉积与分散微观动力学模型;第7章以球形捕捉器为例,阐述了胶体颗粒在固体表面沉积与分散微观动力学模型的求解与计算;第8章阐述了液-固体系中胶体颗粒间相互作用对微粒表面沉积、分散与运移微观动力学特征的影响规律;第9章阐述了多孔介质中液-固体系微粒表面沉积、分散与运移微观动力学特征理论模型及其数学描述;第10章阐述了液-固体系微粒表面沉积、分散与运移微观动力学理论的工程应用示例。

本书所涉及的内容主要来自作者及其所领导的研究小组的合作者以往的研究成果。同时,部分内容参考了近年来国内外同行、专家在这一领域公开出版或发表的相关研究成果。由于作者近20年的研究工作和在本书的编写过程中涉及到的参考资料较多,书中未能一一标出,只将重要的参考资料列于参考文献中。特做此说明,并对他们致以诚挚的谢意。

本书的编写过程中,宋向华同志参加了第5、第7章的部分编写工作,韩勇、孙志宇同志参加了前言、第1、第4章的部分编写工作,张荣军同志参加了第2章的部分编写工作,苏国辉同志参加了第6章的部分编写工作,邹宏江同志参加了第8章的部分编写工作,罗明良同志参加了第9章的部分编写工作,吴飞鹏、秦国伟同志参加了第10章的部分编写工作。

中国石油大学(华东)油气田开发工程国家重点学科211工程建设计划、西安石油大学优秀学术著作出版基金和石油工业出版社对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

目前,液-固体系微粒表面沉积、分散和运移微观动力学理论及其数学模拟问题的研究还很不成熟,诸多方面还处于探索阶段,加之作者水平有限和经验不足,书中难免有不少缺点和错误,欢迎各位同行和专家提出宝贵意见。

目 录

第1章 液-固胶体体系的基本性质	(1)
1.1 分散体系与胶体分散体系	(1)
1.2 胶体体系的分类	(1)
1.3 液-固胶体体系的结构特性	(3)
1.4 液-固界面的润湿性质	(5)
1.5 液-固界面接触角的测定	(7)
1.6 固体自溶液中吸附	(8)
1.7 固体表面毛细管升高现象	(13)
1.8 液-固胶体界面泡沫浮选	(14)
1.9 沉降速度与 Stokes 公式	(15)
1.10 润湿功和铺展系数	(16)
第2章 液-固胶体体系表面电荷平衡理论及其数学模拟	(18)
2.1 纯净氧化物液-固体系表面电荷平衡理论	(18)
2.2 占优结合固-液体系表面电荷平衡理论	(21)
2.3 一般液-固体系表面电荷平衡理论与数学模型	(23)
2.3.1 吸附定势反应	(23)
2.3.2 复合反应	(24)
2.4 应用实例	(26)
2.4.1 矿物氧化物为纯净物质	(26)
2.4.2 简单电解质溶液	(27)
第3章 液-固胶体体系表面阳离子交换理论研究	(36)
3.1 工作液为 $Z:Z$ 对称型电解质溶液	(37)
3.1.1 无限半平面问题	(37)
3.1.2 两平行平板问题	(38)
3.2 工作液为 M^+A^- , $M^{2+}A^{2-}$ 型电解质溶液	(39)
3.2.1 两平板问题	(39)
3.2.2 单一平板问题	(41)
3.3 工作液为 M^+A^- , $M^{2+}(B^-)^2$ 型电解质溶液	(42)
3.3.1 单一无限平面问题	(42)

3.3.2 两平行平面	(44)
3.4 工作液为 M^+A^- , $N^{2+}B^{2-}$, $O^{2+}(C^-)_2$ 型电解质	(45)
3.4.1 无限半平面问题	(45)
3.4.2 两平行平板	(47)
3.5 一般体系中表面双电层正负离子分布规律	(48)
3.6 几个问题的讨论	(49)
3.6.1 关于积分计算	(49)
3.6.2 关于激化势能的确定	(49)
3.6.3 关于固相表面离子的优先吸附	(50)
第4章 液-固体系固相颗粒在表面沉积与分散微观静力学模型	(52)
4.1 微粒沉积、分散与运移的力学平衡	(52)
4.1.1 微粒沉积、分散与运移的力学平衡方程	(53)
4.1.2 微粒分散、运移判定条件	(54)
4.1.3 作用于微粒上的力和力矩	(55)
4.1.4 运动微粒沉积、分散与位移的判定条件	(74)
4.2 控制微粒沉积、分散与位移的主导力系	(74)
4.2.1 微粒分散的主导力	(75)
4.2.2 影响微粒运移规律的主导力	(77)
第5章 固体表面非均质性对颗粒表面作用势能的影响	(80)
5.1 胶体颗粒的形状对范德华引力势能的影响	(80)
5.1.1 逐步递推模型概述	(80)
5.1.2 随机模型的产生	(80)
5.1.3 形状因素	(82)
5.1.4 范德华引力势能的计算	(82)
5.1.5 数据向量	(83)
5.1.6 结果与讨论	(84)
5.2 不相同粗糙度的球形粒子之间的范德华力引力势能	(85)
5.2.1 数学模型概述	(85)
5.2.2 粒子表面粗糙度的数字分析	(85)
5.2.3 范德华引力势能的计算	(87)
5.2.4 有延迟性影响的情况	(89)
5.2.5 结果与讨论	(90)
5.2.6 结论	(90)
5.3 表面非光滑性导致的切应力	(91)

5.3.1	数学模型	(91)
5.3.2	运算法则	(92)
5.3.3	结果分析	(92)
5.3.4	结论	(94)
5.4	主要结论与讨论	(95)
第6章	液-固体系微粒在表面的沉积与分散微观动力学模型	(96)
6.1	拉格朗日方法 (Lagrangian Method)	(96)
6.1.1	惯性的影响	(98)
6.1.2	临界轨迹方法在蠕流中的应用	(99)
6.1.3	随机动态模拟法	(100)
6.2	欧拉方法 (Eulerian Method)	(101)
6.2.1	惯性沉积	(101)
6.2.2	对流扩散方程	(101)
6.2.3	完全吸收模型	(105)
6.2.4	非渗透边界条件	(113)
6.2.5	微粒的表面吸附模型	(115)
6.3	微粒沉积、分散微观动力学主要影响因素分析	(123)
6.3.1	微粒、表面附着力老化与微粒从表面的分离	(124)
6.3.2	表面阻碍效应	(124)
6.3.3	微粒在表面覆盖过程的蒙特卡罗模拟方法	(125)
6.3.4	胶体稳定性对微粒沉积、分散的影响	(126)
6.4	微粒沉积、分散微观动力学实验研究	(128)
6.4.1	捕捉器表面附近水动力学条件	(128)
6.4.2	作用于微粒上的外力和表面胶体力	(128)
6.4.3	试验方法	(129)
6.5	主要实验结果及其讨论	(130)
6.5.1	无能垒情况下的沉积规律	(130)
6.5.2	存在能垒时微粒沉积规律	(132)
6.5.3	捕捉表面微粒的分布规律	(134)
6.5.4	胶体稳定性对微粒沉积的影响	(136)
6.6	研究发展趋势展望	(137)
第7章	液-固体系微粒在球型捕捉器表面沉积与分散微观动力学模型的求解	(140)
7.1	微粒沉积微观动力学输运方程	(140)
7.2	线性等温沉积	(145)

7.2.1 有限体积沉积的一般解	(145)
7.2.2 球形沉积器沉积模型的临界解	(148)
7.2.3 无限体积范围内的沉积	(150)
7.2.4 平面表面沉积	(151)
7.3 计算实例	(156)
7.4 有限体积沉积的临界解	(160)
7.5 结论	(162)
附录 7A	(163)
附录 7B	(166)
第8章 胶体微粒相互作用对微粒表面沉积的影响	(172)
8.1 胶体微粒在部分随机覆盖非均匀表面沉积与分散微观动力学理论模型	(172)
8.1.1 模型的建立	(172)
8.1.2 模拟算法	(174)
8.1.3 模拟计算结果与分析	(175)
8.2 胶体微粒在具有随机吸附点的非均匀表面沉积与分散微观动力学理论模型	(179)
8.2.1 理论模型的建立	(179)
8.2.2 理论模型的数学模拟	(181)
8.3 胶体微粒在电性非均值表面沉积与分散微观动力学模拟实验	(185)
8.3.1 聚苯乙烯胶体颗粒在流向平行非均质表面沉积与分散显微实验	(185)
8.3.2 聚苯乙烯胶体颗粒在流向垂直非均匀表面沉积与分散显微实验	(189)
8.4 表面微粒簇的形成及其对微粒吸附的影响	(197)
第9章 多孔介质液-固体系微粒沉积分散运移微观动力学理论模型	(201)
9.1 微观动力学随机游走模型	(201)
9.1.1 Monte Carlo 方法	(201)
9.1.2 颗粒在网络内的运动	(202)
9.1.3 颗粒在毛细管内的随机沉降计算	(203)
9.2 颗粒在多孔介质内的分形聚集	(209)
9.2.1 问题的提出	(209)
9.2.2 分形理论概念	(209)
9.2.3 分形生长模型	(211)
9.2.4 颗粒运移沉积分形模型	(214)
9.3 随机网络等效介质微观动力学模型	(215)

9.3.1	多孔介质微观渗流等效介质理论	(215)
9.3.2	微粒沉积规律的数学描述	(223)
9.3.3	多孔介质孔隙结构动态变化数学模型	(228)
第10章	液-固体系微观动力学的工程应用示例	(232)
10.1	油气田开采储层多孔介质中微粒的分散与运移微观动力学机理	(232)
10.1.1	储层中黏土矿物微粒分散与运移微观动力学机理	(232)
10.1.2	储层中非黏土矿物微粒分散与运移微观动力学机理	(237)
10.1.3	关于确定孔隙骨架表面定解条件的讨论	(239)
10.2	油气藏开采储层多孔介质中微粒分散、运移微观动力学特征数学 模拟	(241)
10.2.1	储层多孔介质微粒运移分散、堵塞一维问题的数学模拟	(241)
10.2.2	储层多孔介质微粒分散、运移一维问题的数学模拟	(251)
10.2.3	结论与讨论	(254)
10.3	污水深层过滤中固相颗粒沉积、分散、运移微观动力学数学模拟	(255)
10.3.1	液体深层过滤微观动力学研究方法概述	(255)
10.3.2	液体深层过滤毛细管束模型	(257)
10.3.3	液体深层过滤球池模型	(263)
10.3.4	液体深层过滤喉管束模型	(265)
10.3.5	结论	(278)
符号说明		(279)
参考文献		(288)

第1章 液-固胶体体系的基本性质

1.1 分散体系与胶体分散体系

把一种物质分散在另一种物质中所形成的体系被称为分散体系，前者称为分散相，而后者称为分散剂。“胶体”这个名词首先是由英国科学家 Graham 于 1861 年提出的。他在研究物质的扩散性和渗透性时发现，有些物质如蔗糖、食盐和无机盐类在水中扩散很快，能透过羊皮纸；而另一类物质，如明胶、蛋白质和氢氧化铝等在水中扩散很慢，很难或甚至不能透过羊皮纸。前者在溶剂蒸发后成晶体析出，后者则不成晶体而成黏糊的胶状物质。因此，当时 Graham 根据这些现象将物质分成两类，前者称为晶体，后者称为胶体。后来经过大量的试验，人们发现 Graham 将物质绝对地分成晶体和胶体两类的做法是不合适的。俄国科学家 Bernph 于 1905 年先后用了近 200 多种物质进行试验，结果证明任何典型的晶体物质在适当条件下，例如降低其溶解度或选用适当介质，也能制得具有上述特性的胶体。例如，食盐是典型的晶体物质，溶在水中则成溶液，其中氯化钠分子（离解成钠离子和氯离子）具有扩散快、易透过羊皮纸的特性，但是食盐也可设法被分散在适当的有机溶剂中（如酒精或苯等），则所形成的体系中的氯化钠粒子具有扩散慢，不能透过羊皮纸的特性。因此，实质上，胶体只是物质以一定分散程度存在的一种状态，称为胶态，犹如气态、液态和固态，而不是一种特殊类型的物质。

胶体普遍存在于自然界中，它时刻与我们接触，与人类的生活有着极其密切的联系。人们可利用胶体的原理来识别矿物的性质及其在不同条件下发生的变化过程。工业废水是最广泛存在的胶体，为了保护水源，净化水质，提取贵重元素变废为宝，就要研究胶体的形成和破坏。油气田开发过程中防治储层颗粒沉降、分散、运移造成的伤害也要用到有关胶体的概念。另外，研究液-固胶体体系的微观动力学性质在抑制水土流失、给水排水、岩土工程、医药、化工材料、非均相化学催化、电化学、高分子化学等方面也具有十分重要的意义。

1.2 胶体体系的分类

如前所述，胶体是一种或几种物质以一定分散程度分散在另一种物质中所形成的体系，这样的体系称为分散体系。被分散的物质称为分散相，分散相所处的介质称为分散介质。例如，大气层中的尘埃、水滴称为分散相，空气称为分散介质，又如工业

废水中的杂质、泥沙都是分散相，水是分散介质。分散相与分散介质之间存在着相界面，所以胶体是一个多相分散体系。除了胶体以外，溶液、悬浮液和乳状液也都是分散体系，只是溶液是一个均相分散体系（按照热力学中“相”的定义，单个溶质分子或离子不成为一个相。对溶液来说，不需要用分散相和分散介质的名称来描述其中所含的各种组分，有时为了和其他分散体系作比较而沿用这种名称）。按照分散相粒子的大小，常将分散相粒子大小为 1nm 以下的称为分子分散体系（即溶液），粒子大小约在 $1\mu\text{m}$ 以上的称为粗分散体系（即悬浮液），介于 $1\mu\text{m}\sim 1\text{nm}$ 之间的称为胶体分散体系（即胶体或成胶体溶液）。这种按分散相粒子大小对分散体系的分类，在胶体与非胶体之间没有明显的分界线，特别是粒子大小的上限，例如乳状液的液滴大小有时超过 $1\mu\text{m}$ 的，为方便起见，人们也视作胶体来处理。

高分子化合物溶液中的溶质分子大小已属胶体范围，它既具有低分子溶液的均相性，又具有胶体的某些特性，所以有时也把它列入胶体的研究范围内。由于高分子化合物溶液在实用上和理论上的重要性，随着科学的不断发展，日前高分子化合物溶液已逐渐发展成为一门独立的学科分枝。从热力学的观点来说，低分子和高分子溶液都是热力学稳定的均相体系，而胶体溶液和悬浮液都是热力学不稳定的多相体系，因为后者有巨大相界面，很高的表面自由能，以及粒子有自动趋于聚结而下沉的倾向。总之，高度分散的多相性、动力稳定性和热力学不稳定性是胶体体系的 3 大特性，也是胶体的其他特性的依据。人们研究胶体的形成、稳定和破坏，都是从这些基本特性出发的。下列诸因素对决定胶体体系的整个性质作用最大：（1）粒子大小；（2）粒子形状和柔性；（3）表面性质（包括电性质）；（4）粒子与粒子间相互作用；（5）粒子与溶剂间相互作用；（6）粒子材料组分。

按分散相粒子大小对分散体系的分类（表 1.1），以及它们各自的特点，胶体体系可以分为下列 3 大类：

表 1.1 按分散相粒子大小对分散体系的分类

名 称	粒子大小, m	特 性	举 例
低分子溶液	$<10^{-9}$	热力学稳定的均相体系，扩散快，能透过半透膜，光散射很弱	氯化钠、蔗糖等水溶液
高分子溶液 和缔和胶体	$10^{-9}\sim 10^{-6}$	热力学稳定的均相体系，扩散快，不能透过半透膜，有一定光散射	聚苯乙烯溶液、高浓度的肥皂水溶液
溶胶、乳胶液、 泡沫和气溶胶	$10^{-9}\sim 10^{-6}$	热力学不稳定的，但动力稳定的多相体系，扩散慢，不能透过半透膜，光散射强	金溶液、硫溶液、各种泡沫
悬浮体（液）	$>10^{-6}$	热力学不稳定的，动力不稳定的多相体系，扩散慢，不能透过半透膜，光散射强	泥沙悬浮液、大气层中的尘埃和水滴

(1) 溶胶。由于其具有巨大的表面自由能，所以它们是热力学不稳定的多相体系。又因为在相被分离后不易自动恢复成原来的分散体系，所以它们是不可逆体系。

(2) 高分子物质（天然的或合成的）溶液。因为没有界面体系，无界面能存在，所以它们是热力学稳定的均相体系。又因为在溶剂被分离后又能自动地溶解成原来的分散体系，所以它们是可逆体系。

(3) 缔合胶体（也称为胶体电解质）。它们也是热力学稳定的可逆体系。许多表面活性物质在高浓度下可形成缔合胶体。

按照分散相和分散介质的聚集状态来分类，可有表 1.2 所列的 8 种溶胶。并以分散介质的聚集状态来分别命名。例如，分散介质为气态者，则称为气溶胶；分散介质为液态者称为液溶胶（常简称为溶胶）；分散介质为固态者称为固溶胶。液溶胶中分散相为液态者被命名为乳状液；分散相为气态者命名为泡沫。气溶胶中分散相为液态者被命名为雾；分散相为固态者被命名为烟。

表 1.2 按分散相和分散介质的聚集状态对溶胶的分类

分散相	分散介质	名称	实例
气	液	泡沫	灭火泡沫
液		乳状液	金溶胶
固		溶胶	硫溶胶
气	固	固态泡沫	有色玻璃 有色塑料
液		固态乳状液	
固		固溶胶	
液	气	雾	水雾
固		烟	烟、尘

1.3 液-固胶体体系的结构特性

胶体粒子形状的不对称性是影响胶体体系的整个性质的重要因素之一。粗略地来说，胶体粒子的形状可分为球状、片状和线状，但是实际形状往往是极不规则的（图 1.1）。为便于理论研究起见，最简单的形状是球状。事实上，许多胶体体系中的粒子是球状或接近球状。乳状液、泡沫、某些蛋白质分子和金溶胶等的胶粒具有球状对称性。氧化铁胶粒是片状或板状的典型例子，长链高分子量聚合物分子可以作为线状粒子的代表，植物机体主要是由线状纤维质组织构成的，动物和人体组织也是由线状蛋白质分子构成的。当粒子聚集在一起后，可以形成与原来形状完全不同的许多特殊形状。

线型长链高分子量聚合物分子由于围绕 C—C 键或其他键旋转，故表现出分子具有

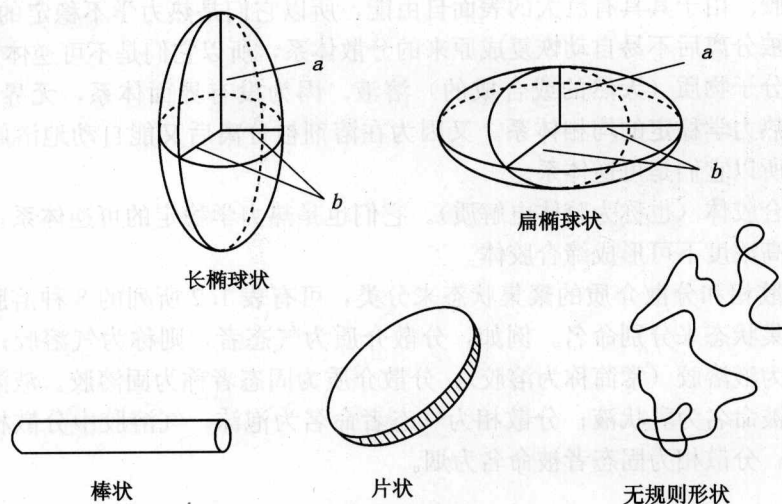


图 1.1 非球状粒子的一些模型示意图

柔性。在分散介质中由于分子热运动的影响，这些分子的形状在不断地改变着，确定某一个固定形状是不合适的。最妥当的理论处理是把高分子量聚合物分子视作无规则团状。但是这样的模型有时也不是十分精确的，因为围绕化学键旋转使分子不完全具有柔性，空间效应也妨碍分子真正具有不规则构型。因此，溶解在介质中的线型高分子量聚合物分子呈扩张状态而不是完全无规则团状。高分子量聚合物分子间和高分子量聚合物分子与溶剂分子间的相对作用力的大小也必须考虑进去。如果高分子量聚合物分子的长链段有彼此粘在一起的倾向，则分子形状呈紧密线团状，有可能导致聚合物沉淀。相反的，由于分子链段的强溶剂化作用或静电排斥作用，分子形状将呈松散线团状。

胶体粒子通常是溶剂化的，溶剂化层一般约为一个分子厚度，这个紧密地被束缚的溶剂化层必须视作粒子一部分来处理。有时大量不能流动的溶剂被机械地包裹在粒子聚集体内部。在高分子量聚合物分子的溶液中，长链可以互相交联在一起，形成三维网络构形，把所有溶剂机械地困在这种网格结构内部，此时体系呈现半固体状，这种胶体体系称为凝胶。例如，白明胶溶于温水中形成溶液但冷却时则形成半固体状的凝胶。按照凝胶的机械性质的不同，可分为下列三类：（1）弹性凝胶，它具有一定的弹性，其形状可以因外力而改变，但当外力除去后它又恢复原状，白明胶属于此类凝胶。（2）脆性凝胶，它的网格结构靠化学键力形成，很难受外力而变形，硅胶就是一例。（3）触变凝胶，这种凝胶在静置时呈半固体状，但当激烈搅拌后变成液态溶胶，流沙泥浆和触变涂料是这类凝胶的典型例子。

胶体体系通常都是多分散性的，粒子大小极不一致的分散体系。要详细地测定某